

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 25.10.96.

30 Priorité :

43 Date de la mise à disposition du public de la demande : 30.04.98 Bulletin 98/18.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Se reporter à la fin du présent fascicule.

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS ÉTABLISS PUBLIC A CARACT SCIENT ET TECH — FR.

72 Inventeur(s) : DREVILLON BERNARD et COMPAIN ERIC.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire : CABINET HARLE ET PHELIP.

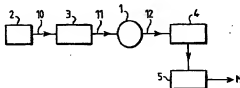
54 COMPOSANT OPTIQUE DE MODULATION, POLARIMÈTRE ET ELLIPSOMÈTRE DE MUELLER COMPRENANT UN TEL COMPOSANT OPTIQUE, PROCÉDE DE CALIBRAGE DE CET ELLIPSOMÈTRE ET PROCÉDE DE MESURE ELLIPSOMETRIQUE.

57 L'invention concerne un composant optique de modulation, et un polarimètre et un ellipsomètre de Mueller comprenant ce composant optique.

Le composant optique module un faisceau incident (10) de lumière polarisée linéairement et renvoie un faisceau modulé (11).

Il comprend un modulateur de phase couplé modulant le faisceau incident deux fois successivement, les deux modulations étant à la même fréquence  $\omega/2\pi$  et étant couplées.

L'ellipsomètre de l'invention comprend des moyens de détection (4) d'un faisceau de mesure (12) renvoyé par un échantillon (1), qui reçoit le faisceau modulé, et une unité de traitement (5). Les moyens de détection comportent un polarimètre produisant  $n$  quantités mesurées représentant les états de polarisation du faisceau et l'unité de traitement produit par transformée de Fourier  $m$  valeurs pour chacune de ces quantités, avec  $n \times m \geq 16$  et  $m \geq 4$ , permettant d'accéder simultanément aux seize coefficients de la matrice de Mueller (M) de l'échantillon.



La présente invention a pour objet un composant optique de modulation, un polarimètre et un ellipsomètre de Mueller comprenant un tel composant optique, un procédé de calibrage de cet ellipsomètre et un procédé de mesure ellipsométrique.

- 5 Pour mesurer des grandeurs représentatives d'un échantillon, telles que des grandeurs optiques, physiques, chimiques ou électriques, il est classique d'avoir recours à l'ellipsométrie. Le champ d'application de l'ellipsométrie standard est cependant restreint à des matériaux non dépolarisants, isotropes et présentant une interface
- 10 plane. L'ellipsométrie généralisée permet de mesurer des matériaux non isotropes, mais seulement s'ils sont non dépolarisants. Or, les besoins courants des industriels, des biologistes et des chimistes portent souvent sur des matériaux dépolarisants, par exemple rugueux ou particuliers.
- 15 L'ellipsométrie de Mueller ou MME (Mueller Matrix Ellipsometry) rend possible la mesure de tout milieu. En effet, les états de polarisation de la lumière peuvent être représentés par un vecteur de dimension 4, qui est classiquement le vecteur de Stokes S de la lumière. On en trouvera par exemple une description dans l'ouvrage de
- 20 Azzam et Bashara, « Ellipsometry and polarized light », North-Holland, pp. 55-60. Le vecteur de Stokes comprend les coordonnées I, Q, U, V, respectivement représentatives des intensités moyennes de quatre états de polarisation différents. Tout milieu peut alors être représenté par une matrice réelle de dimensions  $4 \times 4$  qui décrit les couplages en
- 25 intensités des différents modes de polarisation de la lumière, ces couplages étant provoqués par l'interaction de la lumière avec le milieu. Cette matrice, dite matrice de Mueller M, comprend seize coefficients en général indépendants les uns des autres. L'ellipsométrie de Mueller revient à mesurer la matrice de Mueller
- 30 complète du milieu étudié. Elle est ainsi notamment applicable à des dépôts sur surfaces rugueuses ou des mesures de particules, auxquels les autres procédés de mesure ellipsométrique ne sont pas appropriés.
- Les dispositifs utilisés pour l'ellipsométrie de Mueller, ou ellipsomètres de Mueller comprennent communément une source
- 35 lumineuse, un générateur d'états de polarisation ou PSG (Polarization

States Generator) et un détecteur d'états de polarisation ou PSD (Polarization States Detector), également appelé polarimètre. On en trouvera une description détaillée dans l'article de P.S. Hauge, « Recent developments in instrumentation in ellipsometry », Surface Science, vol. 96, pp. 108-140, 1980. En fonctionnement, on émet un faisceau lumineux avec la source, on donne au faisceau des états de polarisation avec le PSG, on envoie le faisceau sur l'échantillon à mesurer, puis on détecte le faisceau obtenu avec le PSD. Il est connu d'utiliser des polarisateurs et des lames quart d'onde fixes dans le PSG et le PSD en leur donnant seize configurations différentes pour mesurer la matrice de Mueller de l'échantillon. Cette technique manuelle est cependant d'utilisation difficile et peu efficace.

Il a été proposé dans « Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal », R. M. Azzam, Optics Letters, vol. 2, num. 6, pp. 148-150, 1978, un ellipsomètre de Mueller dans lequel le PSG et le PSD comprennent respectivement deux lames quart d'onde tournant à  $\omega$  et  $5\omega$ . Les seize coefficients de la matrice de Mueller sont alors extraits des seize premiers harmoniques de la fréquence  $\omega$  du signal détecté. Ce dispositif a pour inconvénients d'être restreint à de très basses fréquences et de nécessiter l'usage d'un découpeur (chopper) pour éliminer le bruit de fond ambiant.

Il a aussi été proposé, notamment dans « Mueller-matrix measurement using the four-detector photopolarimeter », R.M. Azzam, Optics Letters, Vol. 11, num. 5, pp. 270-272, 1986, des ellipsomètres de Mueller avec PSD multivoies, et un retardateur tournant dans le PSG. Ces dispositifs sont également limités à de basses fréquences de modulation, nécessitant typiquement plusieurs secondes d'acquisition.

Il a aussi été proposé dans « Measurement of Mueller matrices », par R. Anderson, Applied Optics, vol. 31, p.11, 1992, un ellipsomètre de Mueller monovoie comportant un modulateur de polarisation haute fréquence dans le PSG et le PSD. Cependant, plusieurs configurations doivent être combinées pour obtenir une mesure complète.

Un ellipsomètre de Mueller hautes fréquences a été envisagé dans « Measurement of polarized light interactions via the Mueller matrix », Randall C. Thompson et al., Applied Optics, Vol. 19, num. 8, pp. 1323-1332, 1980: il utilise quatre modulateurs de phases électro-optiques à différentes fréquences et seize synchro-détections. Ce dispositif présente les inconvénients d'être cher et compliqué à mettre à oeuvre, ainsi que d'être sensible au bruit car la composante continue du signal n'est pas modulée.

La présente invention vise un ellipsomètre de Mueller permettant des modulations hautes fréquences, simple à mettre en oeuvre et donnant des mesures simultanées et précises des seize coefficients de la matrice de Mueller

L'invention vise également un tel ellipsomètre qui puisse, séparément ou cumulativement, être insensible au bruit ambiant, offrir des capacités spectroscopiques, permettre des modulations à des fréquences aussi élevées que 100 MHz et être utilisable pour des mesures en temps réel par exemple de croissance de couches sur substrat.

De plus, l'invention a pour objectif un procédé de calibrage d'un ellipsomètre de Mueller visé par l'invention, ce procédé étant à la fois précis, rapide et facile à mettre en oeuvre.

L'invention a aussi pour but un procédé de mesure ellipsométrique de Mueller simple à mettre en oeuvre et donnant des mesures simultanées et précises des seize coefficients de la matrice de Mueller, pouvant être mis en oeuvre à de hautes fréquences de modulation.

L'invention vise également un composant optique de modulation qui puisse être utilisé dans le PSG, et éventuellement aussi dans le PSD, d'un ellipsomètre de Mueller. Plus généralement, l'invention a pour but un composant optique de modulation permettant des modulations hautes fréquences et simple à mettre en oeuvre.

L'invention vise aussi un PSD ou polarimètre utilisable dans tout dispositif nécessitant la mesure de la polarisation de la lumière, notamment dans un ellipsomètre de Mueller, pouvant être mis en oeuvre à de hautes fréquences et d'utilisation simple.

A cet effet, l'invention a pour objet un composant optique de modulation comprenant un modulateur de polarisation qui module un faisceau incident de lumière polarisée linéairement et renvoie un faisceau modulé.

- 5 Selon l'invention, le modulateur de polarisation est un modulateur de phase couplé modulant le faisceau incident deux fois successivement, les deux modulations étant strictement à la même fréquence  $\omega/2\pi$  et étant couplées.

- 10 Les deux modulations sont « strictement » à la même fréquence au sens où elles ont entre elles un déphasage relatif qui est fixe dans le temps, et ne subissent donc pas de dérive l'une par rapport à l'autre. Cette identité stricte est préférentiellement obtenue par un asservissement extérieur ou par l'utilisation double d'un même modulateur.

- 15 Par « modulations couplées », on entend des modulations identiques (c'est-à-dire ayant une même fréquence et un déphasage relatif fixe dans le temps) qui ne sont pas réductibles à une unique modulation de phase. Ainsi, les deux modulations ne s'appliquent pas aux mêmes composantes du vecteur de Stokes. Plus précisément, 20 chaque modulation de phase étant appliquée selon un sous-espace vectoriel à deux dimensions de l'espace vectoriel de polarisation à quatre dimensions dans lequel est défini le vecteur de Stokes du faisceau incident, les deux sous-espaces associés respectivement aux deux modulations ne sont pas confondus.

- 25 Les modulations peuvent être couplées en particulier par un écart angulaire entre les directions de modulation, ou au moyen d'un système de couplage.

Le modulateur de phase est dit « couplé » par référence aux deux modulations de phase couplées qu'il applique.

- 30 En termes mathématiques, le composant optique applique une modulation de polarisation telle que le vecteur de Stokes  $S$  du faisceau modulé s'exprime linéairement en fonction d'une base harmonique de la pulsation  $\omega$  par une matrice de rang 4.

- 35 Dans un premier mode de réalisation préféré du composant optique selon l'invention, le modulateur couplé comprend un

modulateur de phase produisant les deux modulations successives et un système de couplage du type polariseur partiel et déphaseur. Le modulateur de phase produit la première modulation et envoie le faisceau incident vers le système de couplage, le système de couplage renvoie le faisceau incident vers le modulateur de phase et le modulateur de phase produit la seconde modulation.

Ce premier mode de réalisation est particulièrement avantageux en ce qu'il permet de moduler à haute fréquence les quatre composantes du vecteur de Stokes, y compris l'intensité moyenne I. En conséquence, lorsqu'il est utilisé dans un PSG, il offre un bas niveau de détection et rend inutile l'emploi d'un découpeur (chopper).

De plus, il nécessite un unique modulateur de phase pour effectuer les deux modulations. Il évite ainsi les problèmes de synchronisation impliquant une commande de phase absolue. Il permet notamment d'employer un modulateur photoélastique, qui fournit une gamme de longueurs d'onde étendue (de 0,2  $\mu\text{m}$  à 19  $\mu\text{m}$ ), une grande fenêtre optique (supérieure à 1 cm) et une faible dépendance à des variations de température.

Préférentiellement dans ce premier mode de réalisation, la lumière du faisceau incident étant polarisée linéairement selon une direction de polarisation, le modulateur de phase et le système de couplage sont orientés respectivement à 45° et 90° de la direction de polarisation.

Dans un deuxième mode de réalisation préféré du composant optique selon l'invention, le modulateur couplé comprend deux modulateurs de phase produisant respectivement les deux mêmes modulations successives, les deux modulateurs de phase ayant une même orientation, et un système de couplage du type polariseur partiel et déphaseur interposé entre les deux modulateurs de phase. Le système de couplage envoie le faisceau incident du premier vers le second des modulateurs de phase.

Les deux modulateurs de phase sont préférentiellement électro-optiques.

Le deuxième mode de réalisation permet de moduler à haute fréquence les quatre composantes du vecteur de Stokes, comme le premier mode de réalisation.

En exprimant que le système de couplage « envoi » le faisceau incident, on entend qu'il peut soit le transmettre, soit le réfléchir.

Préférentiellement dans ce deuxième mode de réalisation, la lumière du faisceau incident étant polarisée linéairement selon une direction de polarisation, les modulateurs de phase, d'une part, et le système de couplage d'autre part, sont orientés respectivement à  $45^\circ$  et  $90^\circ$  de la direction de polarisation.

Dans un troisième mode de réalisation préféré du composant optique selon l'invention, le modulateur couplé comprend un premier modulateur de phase et un second modulateur de phase produisant respectivement les deux mêmes modulations successives, les deux modulateurs de phase ayant des orientations distinctes.

Ce dispositif est particulièrement simple.

Dans ce troisième mode de réalisation, la lumière du faisceau incident étant polarisée linéairement selon une direction de polarisation, les premier et second modulateurs de phase sont préférentiellement orientés respectivement à  $45^\circ$  et  $0^\circ$  de la direction de polarisation.

L'invention a aussi pour objet un polarimètre comprenant un composant optique selon l'invention.

Un tel PSD ou polarimètre peut être employé par exemple dans un ellipsomètre de Mueller, le PSG comprenant un modulateur de polarisation.

L'invention concerne également un ellipsomètre de Mueller destiné à la mesure d'un échantillon représenté par des coefficients d'une matrice de Mueller. L'ellipsomètre comprend:

- une source lumineuse émettant un faisceau lumineux incident,
- un polariseur polarisant linéairement le faisceau incident,

- un modulateur de polarisation modulant le faisceau incident, l'échantillon recevant le faisceau incident modulé et renvoyant un faisceau de mesure,

- des moyens de détection du faisceau de mesure produisant  
5 des signaux électriques, et

- une unité de traitement recevant les signaux électriques produits par les moyens de détection.

Selon l'invention, le modulateur de polarisation est inclus dans un composant optique selon l'invention. De plus, les moyens de  
10 détections comportent un polarimètre produisant  $n$  quantités mesurées représentant les états de polarisation du faisceau de mesure et l'unité de traitement produit par transformée de Fourier  $m$  valeurs pour chacune des  $n$  quantités mesurées, avec  $n \times m \geq 16$  et  $m \geq 4$ , permettant d'accéder aux seize coefficients de la matrice de Mueller.

15 L'ellipsomètre de Mueller selon l'invention repose donc sur des modulations de phase à une fréquence unique. Il permet de s'affranchir de tout élément tournant et d'effectuer des mesures à hautes fréquences, ainsi que d'obtenir une mise en oeuvre simple et des résultats précis. De plus, il peut facilement être adapté sur des  
20 systèmes existants d'ellipsométrie classique à modulation de phase et tirer profit des techniques de traitement numérique qui y sont usuellement employées.

La source lumineuse et le polariseur doivent être considérés comme équivalant à une source de lumière polarisée linéairement.

25 Les moyens de détection peuvent inclure un ou plusieurs photodétecteurs. Dans le premier cas (technique monovoie),  $n = 1$  et  $m \geq 16$  et le polarimètre comprend un système de modulation de la polarisation. Ce système de modulation peut notamment consister en le composant optique selon l'invention. L'état de polarisation produit  
30 est alors dépendant du temps. Le second cas est celui d'une technique multivoie, avantageuse notamment pour effectuer la mesure simultanée des coefficients en n'utilisant qu'une seule modulation de polarisation dans le PSG. Le polarimètre peut alors séparer le faisceau de mesure en plusieurs faisceaux secondaires, chacun ayant un état  
35 de polarisation distinct et étant détecté par un des photodétecteurs, ou



produire des réflexions consécutives du faisceau de mesure sur différents photodétecteurs. De préférence, le PSD ou polarimètre n'introduit pas de nouvelle modulation temporelle, les quantités mesurées étant liées linéairement aux quatre composantes du vecteur de Stokes.

Les quantités mesurées dépendent du temps et sont habituellement des intensités mesurées par le ou les photodétecteurs.

Il est avantageux de choisir des harmoniques de la pulsation  $\omega$  et de calculer avec l'unité de traitement les composantes harmoniques d'ordres correspondants de chacune des quantités mesurées. Les valeurs produites sont alors les coordonnées harmoniques des quantités mesurées selon les composantes harmoniques fixées. Le nombre minimal  $m_0$  de coordonnées harmoniques par quantité mesurée pour obtenir les seize coefficients de la matrice de Mueller est tel que  $m_0 = 4$ , un nombre supérieur de coordonnées harmoniques impliquant des redondances dans la détermination de ces coefficients.

Le produit de la matrice de Mueller  $M$  par le vecteur de Stokes  $S_1$  du faisceau incident sur l'échantillon est égal au vecteur de Stokes  $S_2$  du faisceau de mesure émergent de l'échantillon.

Le PSG de l'ellipsomètre de Mueller est constitué par le polariseur et par le modulateur de polarisation, tandis que le PSD est constitué par les moyens de détection. Le PSG et le PSD ont respectivement une matrice de modulation  $W$  et une matrice de détection  $A$ , cette dernière pouvant ou non varier dans le temps. Les harmoniques de la pulsation  $\omega$  fixés pour le calcul des valeurs produites étant regroupés dans un vecteur harmonique  $H$ , le produit de la matrice de modulation  $W$  par le vecteur harmonique  $H$  donne le vecteur de Stokes  $S_1$  du faisceau incident sortant du PSG. Dans le cas multivoie, les quantités mesurées étant regroupées dans un vecteur quantité  $P$ , le produit de la matrice de détection  $A$  par le vecteur de Stokes  $S_2$  du faisceau de mesure renvoyé par l'échantillon est égal au vecteur quantité  $P$ . On a ainsi:

$$P = (AMW) H.$$

Lorsque le nombre de composantes harmoniques pour chacune des quantités mesurées est égal à  $m$ , les matrices  $W$ ,  $M$  et  $A$  ont respectivement pour dimensions  $4 \times m$ ,  $4 \times 4$  et  $n \times 4$ .

L'ellipsomètre étant de Mueller, la matrice de modulation  $W$  est nécessairement de rang 4 ( $W^T W$  inversible), le PSG est alors dit complet. La matrice de détection  $A$  doit être aussi de rang 4, dans le cas où elle est invariante dans le temps.

Préférentiellement,  $n \geq 4$  et le polarimètre n'introduit pas de nouvelle modulation temporelle.

Ainsi, on s'affranchit de modulations dans le PSD, la matrice de détection  $A$  étant alors invariante au cours du temps et de rang 4. De la sorte, l'ellipsomètre procure une grande simplicité d'utilisation et des capacités hautes fréquences (pas d'éléments mobiles), permet de tirer pleinement profit des techniques multivoies existantes et est particulièrement efficace et facile à mettre en oeuvre.

Dans une forme avantageuse de cette réalisation préférée,  $n = 4$  et  $m = 4$ , et le polarimètre sépare les quatre états de polarisation du faisceau de mesure associés aux quatre quantités mesurées.

Cette forme avantageuse correspond à la configuration minimale n'introduisant pas de modulation en sortie.

Dans un premier mode de réalisation préféré de l'ellipsomètre selon cette forme avantageuse, celui-ci comprend dans le PSG un composant optique selon l'invention, du type avec système de couplage. Les quatre valeurs produites par transformée de Fourier pour chaque quantité mesurée dépendant du temps  $t$  sont alors avantageusement les coordonnées harmoniques de cette quantité mesurée dans la base:

$$\cos \omega t, \sin \omega t, \cos 2 \omega t, \sin 2 \omega t.$$

On conserve ainsi les harmoniques d'ordres 1 et 2, sans avoir besoin de garder l'harmonique d'ordre 0, puisque l'intensité moyenne est modulée.

Dans un second mode de réalisation préféré de l'ellipsomètre selon cette forme avantageuse, celui-ci comprend dans le PSG un composant optique selon l'invention, du type avec modulateurs ayant des orientations distinctes. Les quatre valeurs produites par

transformée de Fourier pour chaque quantité mesurée dépendant du temps  $t$  sont alors avantageusement les coordonnées harmoniques de cette quantité mesurée dans la base:

$$1, \cos \omega t, \sin \omega t, \cos 2 \omega t.$$

- 5 La composante constante (harmonique d'ordre 0) fait nécessairement partie de la base harmonique retenue, car l'intensité moyenne  $I$  n'est pas modulée.

- Dans le cas monovoie ( $n=1$ ), le PSG et le PSD peuvent correspondre indifféremment à l'un des modes de réalisation décrits précédemment, le PSD modulant la polarisation à une fréquence 5 fois supérieure ou inférieure à celle du PSG.

- De manière préférée, les deux modulations de phase appliquées par le PSG ayant un même déphasage  $\delta$  dépendant du temps  $t$ , l'unité de traitement produit les  $m$  valeurs pour chaque 15 quantité mesurée, cette quantité mesurée étant une fonction  $f$  du temps  $t$ , au moyen d'une transformée de Fourier spéciale selon laquelle, l'intervalle  $[0, 2\pi/\omega]$  étant discrétisé en  $2N$  points  $T_k$  équirépartis et la fonction  $f$  étant calculée à des instants d'échantillonnage  $t_k$  donné par:

- 20  $\delta(t_k) = \omega T_k$ ,  
pour  $k$  variant de 0 à  $2N-1$ , l'unité de traitement évalue la  $j$ -ème composante harmonique  $H_j$  de la fonction  $f$ , par:

$$H_j = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{2N-1} f(t_k) \exp(-ij \omega T_k),$$

- 25 avec  $i^2 = -1$ .

- La transformée de Fourier spéciale ou SFFT (Special Fast Fourier Transform) permet d'obtenir un déphasage  $\delta(t)$  égal à  $\omega t$  (modulo  $2\pi$ ) sur une période, quels que soient les modulateurs de phase employés. Elle donne ainsi des résultats très précis et évite 30 l'apparition de singularités dans le cas d'un modulateur photoélastique.

Les moyens de détection et l'unité de traitement sont également avantageusement adaptés à des mesures spectroscopiques.

L'invention a aussi pour objet un procédé de calibrage de l'ellipsomètre selon l'invention. Le polariseur et le modulateur de polarisation constituant un générateur d'états de polarisation, et le générateur d'états de polarisation et les moyens de détection ayant  
5 respectivement une matrice de modulation et une matrice de détection:

- on choisit un ensemble d'entités de calibrage ayant des matrices de Mueller connues, l'une de ces entités correspondant à la matrice identité,
- pour chacune des entités de calibrage, on adopte cette entité  
10 comme échantillon dans l'ellipsomètre, on émet un faisceau lumineux incident polarisé linéairement avec la source lumineuse et le polariseur, on module le faisceau incident par le modulateur couplé, on envoie le faisceau incident modulé sur l'entité et on renvoie un faisceau de mesure, on produit les quantités mesurées par les moyens  
15 de détection et les valeurs par l'unité de traitement et on construit, à partir de ces valeurs, une matrice mesurée produit des matrices de détection, de Mueller de l'entité et de modulation,
- on établit un système d'équations linéaires à partir des matrices mesurées, et
- 20 - on résout ce système de façon à extraire les matrices de modulation et de détection.

Effectuer une mesure avec l'entité correspondant à la matrice identité revient à ne mettre aucun échantillon entre le PSG et le PSD.

- La mesure des matrices de modulation W et de détection A est  
25 ainsi effectuée de manière automatique grâce à ce procédé d'autocalibrage. On obtient des résultats précis d'une façon rapide et simple, sans avoir notamment à démonter le dispositif.

Dans une mise en oeuvre avantageuse du procédé de calibrage selon l'invention, on choisit un ensemble d'entités  
30 comprenant:

- un polariseur linéaire à 0° en transmission,
- un polariseur linéaire à 45° en transmission, et
- un polariseur partiel et déphaseur sans valeurs singulières.

Ce procédé de calibrage est particulièrement approprié au cas  
35 où le PSD sépare le faisceau de mesure en quatre états de

polarisation ( $n = 4$ ) et où on détermine pour chacune des intensités détectées associées, quatre valeurs correspondant aux premiers harmoniques.

5 L'invention concerne également un procédé de mesure ellipsométrique de Mueller destinée à la mesure d'un échantillon représenté par des coefficients d'une matrice de Mueller. Dans ce procédé:

- on émet un faisceau lumineux incident polarisé linéairement,
- on module le faisceau incident par un modulateur de  
10 polarisation,
  - on envoie sur l'échantillon le faisceau incident modulé et on renvoie un faisceau de mesure,
  - on détecte le faisceau de mesure et on produit des signaux électriques, par des moyens de détection, et

15 - on transmet les signaux électriques à une unité de traitement.

Selon l'invention:

- on applique deux modulations de phase successives au faisceau incident au moyen du modulateur de polarisation, les deux modulations étant strictement à la même fréquence  $\omega/2\pi$  et étant  
20 couplées,
    - on produit  $n$  quantités mesurées représentant les états de polarisation du faisceau de mesure, par les moyens de détection,
    - on produit par transformée de Fourier  $m$  valeurs pour chacune des  $n$  quantités mesurées au moyen de l'unité de traitement,
- 25 avec  $n \times m \geq 16$  et  $m \geq 4$ , permettant d'accéder aux seize coefficients de la matrice de Mueller.

Ce procédé permet de mesurer à haute fréquence la matrice de Mueller complète de l'échantillon, avec précision et d'une manière simple.

30 La transformée de Fourier peut être effectuée par une transformée de Fourier rapide ou FFT (Fast Fourier Transform) standard ou par la SFFT. Cette dernière améliore la précision en présence de modulateurs électro-optiques et rend possible le calcul des  $m$  valeurs en présence de modulateurs photoélastiques.

La présente invention sera illustrée par la description qui suit à l'aide d'exemples de réalisation du composant optique, du polarimètre et de l'ellipsomètre de Mueller selon l'invention, et de mise en oeuvre des procédés de calibrage et de mesure ellipsométrique selon l'invention, donnés à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés:

- La Figure 1 est un schéma de principe d'un ellipsomètre de Mueller selon l'invention;
  - La Figure 2 schématise le PSG d'un premier mode de réalisation de l'ellipsomètre de Mueller selon l'invention;
  - La Figure 3 montre un dispositif correspondant au PSG de la Figure 2;
  - La Figure 4 représente le PSD du premier mode de réalisation de l'ellipsomètre de Mueller;
  - La Figure 5 schématise l'ensemble de l'ellipsomètre de Mueller selon le premier mode de réalisation des Figures 2 à 4, en faisant ressortir les systèmes de commande et de traitement;
  - La Figure 6 représente une évolution temporelle du déphasage et un échantillonnage d'acquisition employés dans le montage de la Figure 5;
  - La Figure 7 montre le PSG d'un deuxième mode de réalisation de l'ellipsomètre de Mueller selon l'invention;
  - La Figure 8 représente une évolution temporelle du déphasage et un échantillonnage d'acquisition employés avec le deuxième mode de réalisation de l'ellipsomètre correspondant à la Figure 7;
  - La Figure 9 schématise le PSG d'un troisième mode de réalisation d'un ellipsomètre de Mueller selon l'invention.
- Un ellipsomètre de Mueller selon l'invention, représenté sur la Figure 1, comprend une source lumineuse 2 émettant un faisceau incident 10 et un générateur d'états de polarisation ou PSG 3, qui transforme de façon contrôlée l'état de polarisation du faisceau incident 10. Le PSG 3 polarise linéairement le faisceau incident 10 et lui applique une modulation de polarisation. Il transmet le faisceau incident modulé 11 vers un échantillon 1 à mesurer. L'ellipsomètre

comprend aussi un détecteur d'états de polarisation ou PSD 4, qui détecte un faisceau de mesure 12 renvoyé par l'échantillon 1 et une unité de traitement 5 recevant des signaux électriques produits par le PSD 4. L'échantillon 1 ayant une matrice de Mueller M, l'unité de traitement 5 détermine complètement cette matrice M au cours d'une mesure, d'une manière automatique.

Dans un premier mode de réalisation de l'ellipsomètre de Mueller selon l'invention, schématisé sur la Figure 2, le PSG 3A comprend un polariseur linéaire 20 et un modulateur couplé 6A comportant deux modulateurs de phase 21 et 22 et un système de couplage 23 du type polariseur partiel et déphaseur. Les deux modulateurs de phase 21 et 22 ont une même orientation et le système de couplage 23 est interposé entre eux et transmet le faisceau incident 10 du premier modulateur de phase 21 vers le second modulateur de phase 22.

Préférentiellement, les orientations des différents éléments sont les suivants. Le faisceau incident 10 ayant une direction et un sens de propagation et un plan incident étant défini à partir de cette direction de propagation et de l'échantillon 1, on forme un repère comportant un premier axe x perpendiculaire à la direction de propagation et dans le plan d'incidence, un deuxième axe y perpendiculaire au plan d'incidence et un troisième axe parallèle à la direction de propagation et orienté dans le même sens, ce repère étant direct. Le polariseur 20 est alors un polariseur parfait orienté selon l'axe y. Les deux modulateurs de phase 21 et 22 sont identiques et orientés dans le plan x-y selon des directions formant respectivement avec l'axe y des angles  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ . Les angles  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont identiques et préférentiellement égaux à  $\pi/4$ . Le système de couplage 23 est orienté selon l'axe x.

En fonctionnement le faisceau incident 10 est polarisé linéairement par le polariseur 20, puis subit une double modulation couplée du fait des modulateurs de phase 21, 22 et du système de couplage 23. Le système de couplage 23 assure deux fonctions: une polarisation partielle (polariseur imparfait) qui module l'intensité

moyenne I et un déphasage qui mêle les composants U et V du vecteur de Stokes S.

Selon une réalisation particulière de ce PSG 3A, représentée sur la Figure 3, le polariseur 20 est un polariseur commercialisé sous le nom de « Polariseur de Glan Thomson » et les modulateurs de phase 21, 22 sont des modulateurs électro-optiques du type cellules de Pockels. L'utilisation de modulateurs électro-optiques rend possible une commande de phase absolue qui permet de synchroniser les modulateurs de phase 21 et 22. Le modulateur double 6A comprend aussi des cellules commercialisées sous le nom de cellules de Peltier, régulant thermiquement les cellules de Pockels.

Le système de couplage 23 comporte avantageusement deux lames transparentes 24 et 25 recouvertes d'une couche très mince d'or, orientées pour éviter de générer un décalage de faisceau. Il reçoit le faisceau 10 avec un angle d'incidence  $\varphi_0$  (angle entre la direction de propagation et l'orientation de la première lame 24), préférentiellement égal à  $60^\circ$ .

Le système de couplage 23 en transmission peut être remplacé par un système de couplage en réflexion, par exemple sous la forme de lames recouvertes d'une couche de chrome.

Le PSG 3A comprend aussi un séparateur 27 de faisceaux, disposé sur le trajet du faisceau incident modulé 11 après les modulateurs 21, 22. Ce séparateur 27 prélève un faisceau de commande 15, utilisé pour agir sur les modulations afin de compenser des fluctuations parasites. De préférence, le séparateur 27 prélève 4% de l'intensité lumineuse dans le faisceau de commande 15. Il peut s'agir d'une lame de verre inclinée à  $45^\circ$  de la direction de propagation.

Avantageusement, la source lumineuse 2 émet des faisceaux laser 13, 14 à plusieurs longueurs d'onde. L'ellipsomètre comprend alors un miroir 26 mobile permettant de sélectionner la longueur d'onde désirée.

Le PSD 4, comme représenté à la Figure 4, comprend avantageusement un séparateur 30 de faisceaux séparant le faisceau de mesure 12 en au moins quatre faisceaux secondaires 16-19. Le



PSD 4 comprend également des analyseurs de polarisation 36-39 donnant à chacun de ces faisceaux secondaires 16-19 un état de polarisation distinct et des photodétecteurs 31-34 détectant respectivement les intensités  $I_1$  à  $I_4$  des faisceaux secondaires 16-19.

- 5 A titre d'exemple, les faisceaux secondaires 16-19 étant au nombre de quatre, les analyseurs de polarisation 36-39 associés sont respectivement rien, un polariseur linéaire à  $90^\circ$ , un polariseur linéaire à  $-45^\circ$  et l'association d'une lame quart d'onde à  $45^\circ$  et d'un polariseur à  $90^\circ$ .

- 10 Le montage de commande et de traitement du signal va maintenant être détaillé, en référence à la Figure 5.

- Le PSG 3A comprend un générateur de signal 41 relié aux modulateurs 21 et 22 par l'intermédiaire d'un amplificateur 42. Ce générateur de signal 41 applique par l'intermédiaire de l'amplificateur 15 42 une tension aux modulateurs 21, 22. Cette tension se traduit sur le faisceau 10 par un déphasage  $\delta$  de la polarisation, proportionnel à cette tension au cours du temps  $t$ . Préférentiellement, ce déphasage  $\delta$  est constitué de rampes de période  $2\pi/\omega$  et de pente  $\omega$  sur chaque période. De la sorte, toute fonction périodique de  $\delta(t)$  de période  $2\pi$  20 est la même fonction périodique de  $\omega t$ .

- L'unité de traitement 5 comprend un processeur de signaux de données 40 ou DSP (Data Signal Processor), qui reçoit des signaux électriques en provenance du PSD 4. Le PSD 4 peut être relié au DSP 40 par un multiplexeur 47, ou par tout autre moyen connu. Le DSP 40 25 calcule les coordonnées harmoniques des intensités des faisceaux secondaires 16-19 mesurées. Avantagusement, les harmoniques de calcul sont les quatre d'ordres 1 et 2:

$$\cos \omega t, \sin \omega t, \cos 2 \omega t, \sin 2 \omega t.$$

- Il n'est pas nécessaire de garder la composante continue, car 30 l'intensité moyenne  $I$  du faisceau incident 10 est modulée par le PSG 3A.

- Dans une variante de réalisation, le DSP 40 calcule les coordonnées harmoniques dans une base comportant plus de quatre harmoniques, regroupant par exemple les précédents et des 35 harmoniques d'ordres supérieurs à 2.

Le DSP 40 est équipé d'un convertisseur analogique numérique ou ADC (Analogic Digital Converter) qui lui fournit des valeurs des signaux électriques provenant du PSD 4 en des points d'échantillonnage, ainsi que d'une mémoire du type FIFO, qui moyenne ces valeurs durant plusieurs périodes avant qu'elles soient traitées par le DSP 40. Avantageusement, l'échantillonnage comprend seize points par période.

L'unité de traitement 5 comprend également un ordinateur 43, qui reçoit les coordonnées harmoniques calculées par le DSP 40.

D'une manière préférée, comme illustré à la Figure 5, l'unité de traitement 5 comprend un générateur d'échantillonnage 45 asservi en phase au générateur de signal 41. Le générateur d'échantillonnage 45 fournit des instants d'échantillonnage au DSP 40. Le traitement du signal par le DSP 40 à partir de ces instants est avantageusement mis en oeuvre par une transformée de Fourier rapide spéciale, ou SFFT (Special Fast Fourier Transform) dont on décrit ci-après le principe. L'intervalle  $[0, 2\pi/\omega]$  étant discrétisé en  $2N$  points  $T_k$  équidistribués, le générateur d'échantillonnage 45 détermine pour chaque période de modulation les instants d'échantillonnage  $t_k$  donnés par:

$$\delta(t_k) = \omega T_k,$$

pour  $k$  variant de 0 à  $2N-1$ . Un signal électrique fourni par le PSD 4 étant représenté par une fonction  $f$  du temps  $t$ , le DSP 40 évalue la  $j$ -ème composante harmonique  $H_j$  de la fonction  $f$  par:

$$H_j = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{2N-1} f(t_k) \exp(-ij \omega T_k),$$

avec  $i^2 = -1$ .

Le cas usuel de la FFT correspond à  $t_k = T_k$ , quel que soit  $k$ .

L'avantage de la SFFT est qu'elle permet de corriger numériquement des écarts du déphasage  $\delta$  réellement appliqué par les modulateurs de phase 21 et 22 par rapport à un déphasage idéal qui consisterait en des rampes parfaites. Ces écarts peuvent être par exemple dus à un temps de montée de l'amplificateur 42, entraînant des erreurs de l'ordre de 10% à 50 kHz.

Ainsi, comme on peut le voir sur la Figure 6, la courbe 54 donnant le déphasage  $\delta$  (axe 52) en fonction du temps  $t$  (axe 51) admet sur chaque période de modulations  $T$  une partie linéaire 55 correspondant à la rampe désirée et une partie 56 parasite due au temps de montée. Le générateur d'échantillonnage 45 procède de telle sorte que les instants d'échantillonnage  $t_0, t_1, \dots, t_{15}$  sont équi-répartis sur une durée d'acquisition  $D_a$  associés à la partie linéaire 55. Aucune acquisition n'a lieu en revanche pendant une durée de non-acquisition  $D_n$  correspondant à la partie parasite 56. Une variation sinusoïdale du déphasage  $\delta$  (axe 53) en fonction du temps (axe 51) a donc une courbe 57 qui admet sur chaque période  $T$  une partie régulière 58 pendant la durée  $D_a$  et une partie parasite 59 pendant la durée  $D_n$ . La partie régulière 58 est celle qui serait obtenue avec un déphasage  $\omega t$  (au signe près). La forme de modulation produisant la courbe 54 n'est usuellement réalisable qu'avec des modulateurs de phase de type électro-optique.

Ce traitement du signal est particulièrement efficace et précis. Cependant, dans une variante, le générateur d'échantillonnage 45 est absent de l'unité de traitement 5 et le DSP 40 est équipé d'une boucle à phase asservie ou PLL (Phase Locked Loop). Dans ce cas, la PLL génère des instants d'échantillonnage  $T_k$  équi-répartis sur chaque période et le DSP 40 effectue une transformée de Fourier rapide usuelle.

Le PSG 3A est équipé d'un système de stabilisation temporelle de modulation de phase. Ce système (Figure 5) comprend le séparateur 27 de faisceaux, qui envoie le faisceau de commande 15 vers le DSP 40 par l'intermédiaire d'un photomultiplicateur 46. Le système de stabilisation comprend également un convertisseur numérique-analogique 44 ou DAC (Digital Analogic Converter), qui reçoit des signaux de commande de l'ordinateur 43 et fournit à l'amplificateur 42 des tensions de contrôle (bias voltages)  $U_1$  et  $U_2$  respectivement destinées aux modulateurs 21 et 22.

En fonctionnement, le DSP 40 calcule les coordonnées harmoniques associées au faisceau de commande 15, représentatif du faisceau incident modulé 11, dans la base harmonique fixée. Il fournit

ces coordonnées harmoniques à l'ordinateur 43, qui détermine, à partir de valeurs de consigne, les tensions  $U_1$  et  $U_2$  à appliquer pour compenser des déphasages parasites, dus notamment à des variations de température. L'ordinateur 43 fournit ensuite ces tensions  $U_1$ ,  $U_2$  à l'amplificateur 42 par l'intermédiaire du DAC 44. Chacune de ces tensions de contrôle  $U_1$  et  $U_2$  s'ajoute alors à la tension  $U$  fournie par le générateur de fonction 41, avant amplification par l'amplificateur 42.

Dans un deuxième mode de réalisation de l'ellipsomètre selon l'invention, représenté sur la Figure 7, le PSG 3B comporte un unique modulateur de phase. Dans ce deuxième mode de réalisation, les éléments identiques à ceux du premier mode de réalisation sont désignés par les mêmes références. Le PSG 3B comprend un polariseur 20 polarisant linéairement le faisceau incident 10 et un modulateur couplé 6B comportant un unique modulateur de phase 21 et un système de couplage 61 du type polariseur partiel et déphaseur, fonctionnant en réflexion. Le modulateur de phase 21 est interposé entre le polariseur 20 et le système de couplage 61, de telle sorte qu'il produit une première modulation du faisceau incident 10 polarisé et l'envoie vers le système de couplage 61, ce dernier renvoyant le faisceau incident 10 vers le modulateur de phase 21 qui produit une seconde modulation. Le modulateur couplé 6B comprend également un miroir 62 disposé entre le polariseur 20 et le modulateur 21, qui réfléchit le faisceau 11 modulé deux fois vers l'échantillon 1.

Les axes  $x$  et  $y$  étant définis comme dans le premier mode de réalisation, selon une forme préférée, le polariseur 20 est orienté selon l'axe  $y$  et le modulateur 21 est orienté dans le plan  $x$ - $y$  selon une direction formant un angle  $\alpha_3$  avec l'axe  $x$ ,  $\alpha_3$  étant égal à  $45^\circ$ . Le système de couplage 61 est quant à lui orienté selon l'axe  $x$ , de manière à permettre un retour du faisceau incident 10 parallèlement à l'aller. Le miroir 62 renvoie avantageusement le faisceau 11 selon l'axe  $y$ .

Dans une première variante de réalisation, le modulateur 21 est un modulateur électro-optique. Un tel modulateur 21 permet une commande externe de déphasage et, sous la forme d'une cellule de Pockels, d'avoir une bande passante dépassant 100 MHz. Cette bande

passante ne dépend que du générateur de signal 41 et de l'amplificateur 42.

Dans une seconde variante, le modulateur de phase 21 est un modulateur photoélastique. On obtient ainsi une gamme de longueur d'onde étendue et une grande fenêtre optique. La forme du déphasage  $\delta(t)$  est alors fixée et elle est proportionnelle à  $\sin \omega t$  (Figure 8). Dans cette seconde variante, on calcule les harmoniques voulus au moyen de la SFFT précédemment décrite, par exemple par un générateur d'échantillonnage et un DSP semblable à ceux du premier mode de réalisation référencés respectivement 45 et 40 (Figure 5). La matrice de modulation  $W$  du PSG 3B est ainsi de rang 4, alors qu'une FFT usuelle rendrait cette matrice singulière. Le modulateur 21 a une amplitude de modulation supérieure ou égale à  $\pi$ , de façon à rendre la SFFT applicable.

A titre d'exemple, le modulateur de phase 21 applique un déphasage temporel  $\delta$  de la forme:

$$\delta(t) = \pi \sin \omega t,$$

comme représenté sur la Figure 8. En adoptant un échantillonnage de huit points par période  $T$ , égale à  $2\pi/\omega$ , on obtient les huit points  $T_0-T_7$  équi-répartis sur la période  $T$  (et d'une manière similaire sur la période suivante:  $T'_0-T'_7$ ). Les huit instants d'échantillonnage  $t_0-t_7$  (et sur la période suivante  $t'_0, t'_1$ , etc.) sont obtenus par la formule de la SFFT, et répartis sur une durée d'acquisition  $D_a$ . La durée complémentaire sur la période  $T$  est composée de deux durées  $D_{n1}$  et  $D_{n2}$  de non-acquisition. Les images des instants d'échantillonnage  $t_k$  sont alors obtenues à partir de la courbe 65 donnant le déphasage  $\delta$  en fonction du temps  $t$  et de la courbe 66, de la forme  $\omega t$ . Les images des instants  $t_k$  sur la courbe 65 correspondent aux images des points  $T_k$  sur la courbe 66.

Le choix de la base d'harmoniques dans ce deuxième mode de réalisation est avantageusement le même que celui indiqué pour le premier mode de réalisation.

Dans un troisième mode de réalisation de l'ellipsomètre de Mueller selon l'invention, représenté sur la Figure 9, son PSG 3C comporte un modulateur couplé 6C comprenant deux modulateurs de

phase 71 et 72 ayant des orientations distinctes. On produit ainsi un couplage entre les modulateurs 71, 72.

Selon une configuration avantageuse de ce troisième mode de réalisation, les axes  $x$  et  $y$  étant définis comme précédemment, le PSG 3C comporte un polariseur linéaire 70 orienté selon l'axe  $x$ , le modulateur 71 orienté dans le plan  $x, y$  et formant un angle  $\alpha_4$  avec l'axe  $x$  et le second modulateur 72 orienté selon l'axe  $x$ . Préférentiellement, l'angle  $\alpha_4$  vaut  $45^\circ$ .

Préférentiellement, le PSD 4 de ce troisième mode de réalisation comprend un séparateur d'états de polarisation semblable à celui décrit dans le premier mode de réalisation. La base harmonique choisie comprend alors avantageusement:

$$1, \cos \omega t, \sin^2 \omega t, \cos 2 \omega t.$$

La présence de la composante constante est nécessaire, dans la mesure où l'intensité moyenne  $I$  n'est pas modulée. Le nombre de composantes harmoniques retenu est égal à quatre dans une première variante de réalisation, et supérieur à quatre dans une seconde variante permettant d'obtenir des redondances.

Préférentiellement, l'ellipsomètre comporte un découpeur produisant une modulation de l'intensité moyenne  $I$ .

Dans les modes de réalisation présentés jusqu'à présent, le PSD 4 repose sur un séparateur d'états de polarisation (Figure 4) comprenant des éléments fixes sans modulation. Une variante consiste à utiliser les réflexions consécutives du faisceau de mesure 12 sur au moins quatre photodétecteurs. On trouvera une description d'un tel PSD dans « Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light », R.M. Azzam, Optics Letters, Vol. 10, pp. 309-311, 1985. Ces techniques multivoies ont pour point commun de mesurer les états de polarisation sans nouvelle modulation ni partie mobile

Dans un autre mode de réalisation, le PSD 4 comprend un modulateur de polarisation à une fréquence différente de celle du PSG 3. L'ellipsomètre utilise alors une technique monovoie, la base d'harmoniques choisie comprenant au moins seize composantes. Il est

également possible d'utiliser pour le PSD une technique monovoie ou multivoie impliquant des éléments mobiles.

Dans le cas monovoie ( $n=1$ ), l'un des PSG 3A, 3B, 3C décrits précédemment peut être utilisé comme PSD dans le bras de sortie, associé à l'un quelconque des PSG dans le bras d'entrée. Le PSD correspond dans ce cas aux Figures 2, 7 et 9 à l'exception que le polariseur 20, 70 est situé dans le faisceau émergent 11 au lieu du faisceau de polarisation incident 10. L'orientation des éléments optiques est avantageusement la même dans le PSD et le PSG. La fréquence de modulation du PSD correspond à 5 fois ou  $1/5$  fois celle ( $\omega/2\pi$ ) du PSG. L'unité de traitement fournit par transformée de Fourier 16 valeurs indépendantes ( $m = 16$ ).

Plus généralement, l'un quelconque des PSG 3A, 3B, 3C peut être utilisé indépendamment comme détecteur d'états de polarisation (mesure du vecteur de Stokes) dans tout montage optique.

On s'intéressera maintenant au calibrage de l'ellipsomètre. On distingue deux niveaux de calibrage.

Le premier niveau concerne l'orientation des éléments optiques, la détermination de l'amplitude de modulation et l'opération d'asservissement. De préférence, on opère de la façon suivante: on définit une référence d'angle absolu par l'orientation du polariseur 20, 70 du PSG 3. Pour se faire, on fait en sorte qu'une lumière polarisée linéairement dans le plan d'incidence soit réfléchi sans polarisation croisée. Ainsi, on utilise un polariseur dans le faisceau incident et un, tourné à  $\pi/2$  du premier, dans le faisceau réfléchi, et on les tourne ensemble jusqu'à ce que le faisceau soit complètement éteint. On aligne ensuite les autres éléments optiques par rapport à ce polariseur 20, 70.

Pour orienter les modulateurs de phase 21, 22, 71, 72, on annule la modulation, ce qui correspond à l'alignement du polariseur 20, 70 d'entrée et de l'axe propre (fast axis) des modulateurs.

On obtient la bonne modulation d'amplitude, c'est-à-dire les pentes correctes de rampes, en minimisant les harmoniques supérieures par rapport à l'harmonique d'ordre 1 avec un seul

modulateur. On détermine expérimentalement les paramètres nécessaires pour l'asservissement.

Le second niveau de calibrage, qui est le plus important, est la détermination des matrices de modulation  $W$  et de détection  $A$ . On  
5 emploie préférentiellement un procédé d'auto-calibrage décrit ci-après. On choisit tout d'abord un ensemble d'entités de calibrage ayant des matrices de Mueller connues. L'une de ces matrices de Mueller est la matrice identité  $I_0$  (rien en transmission). On adopte ensuite successivement chacune des autres entités de calibrage comme  
10 échantillon 1 et on procède à des mesures ellipsométriques. On obtient ainsi pour chaque entité de matrice de Mueller  $M$ , la matrice  $AMW$  à partir de ces mesures. On mesure également la matrice  $A|OW$ . On établit ensuite un système d'équations linéaires, qu'on résout de manière à extraire les matrices de modulation  $W$  et de détection  $A$ .

15 De préférence, on choisit un nombre d'entités suffisant pour surdéterminer le calcul des matrices  $W$  et  $A$ . A titre d'exemple, le PSD 4 comprenant un séparateur d'états de polarisation n'introduisant pas de nouvelle modulation temporelle, on utilise successivement quatre entités. Une de ces quatre entités est le vide, la mesure étant  
20 effectuée en transmission sans échantillon. L'ensemble des trois autres entités comprend en transmission un polariseur linéaire à  $0^\circ$  et un polariseur linéaire à  $45^\circ$ , et en réflexion ou transmission un polariseur partiel et déphaseur sans valeur singulière. Ce dernier peut être une lame quart d'onde. Préférentiellement, on mesure alors  
25 précisément sa matrice de Mueller par ellipsométrie standard.

On extrait les matrices  $W$  et  $A$  du système linéaire surdéterminé au moyen d'un algorithme de moindres carrés.

La méthode d'auto-calibrage donne des résultats très précis, du fait qu'elle est liée à l'auto-cohérence du formalisme de Mueller.  
30 Elle est également facile et rapide à mettre en oeuvre.

L'ellipsomètre de Mueller selon l'invention est approprié à des mesures tant monochromatiques que spectroscopiques.



### REVENDICATIONS

1. Composant optique de modulation comprenant un modulateur de polarisation (6A, 6B, 6C) qui module un faisceau incident (10) de lumière polarisée linéairement et renvoie un faisceau modulé (11), caractérisé en ce que le modulateur de polarisation (6A, 6B, 6C) est un modulateur de phase couplé modulant le faisceau incident (10) deux fois successivement, les deux modulations étant strictement à la même fréquence  $\omega/2\pi$  et étant couplées.
2. Composant optique selon la revendication 1, caractérisé en ce que le modulateur couplé (6B) comprend un modulateur de phase (21) produisant les deux modulations successives et un système de couplage (61) du type polariseur partiel et déphaseur, le modulateur de phase (21) produisant la première modulation et envoyant le faisceau incident (10) vers le système de couplage (61), le système de couplage (61) renvoyant le faisceau incident (10) vers le modulateur de phase (21) et le modulateur de phase (21) produisant la seconde modulation.
3. Composant optique selon la revendication 2, caractérisé en ce que la lumière du faisceau incident (10) étant polarisée linéairement selon une direction de polarisation (y), le modulateur de phase (21) et le système de couplage (61) sont orientés respectivement à 45° et 90° de la direction de polarisation (y).
4. Composant optique selon la revendication 1, caractérisé en ce que le modulateur couplé (6A) comprend deux modulateurs de phase (21, 22) produisant respectivement les deux mêmes modulations successives, les deux modulateurs de phase (21, 22) ayant une même orientation et un système de couplage (23) du type polariseur partiel et déphaseur interposé entre les deux modulateurs de phase (21, 22) envoyant le faisceau incident (10) du premier (21) vers le second (22) desdits modulateurs de phase.
5. Composant optique selon la revendication 4, caractérisé en ce que la lumière du faisceau incident (10) étant polarisée linéairement selon une direction de polarisation (y), les modulateurs de phase (21, 22), d'une part, et le système de couplage (23) d'autre

part, sont orientés respectivement à  $45^\circ$  et  $90^\circ$  de la direction de polarisation (y).

6. Composant optique selon la revendication 1, caractérisé en ce que le modulateur couplé (8C) comprend un premier modulateur de phase (71) et un second modulateur de phase (72) produisant respectivement les deux mêmes modulations successives, les deux modulateurs de phase (71, 72) ayant des orientations distinctes.

7. Composant optique selon la revendication 6, caractérisé en ce que la lumière du faisceau incident (10) étant polarisée linéairement selon une direction de polarisation (x), les premier et second modulateurs de phase (71, 72) sont orientés respectivement à  $45^\circ$  et  $0^\circ$  de la direction de polarisation (x).

8. Polarimètre caractérisé en ce qu'il comprend un composant optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.

9. Ellipsomètre de Mueller destiné à la mesure d'un échantillon (1) représenté par des coefficients d'une matrice de Mueller (M) comprenant:

- une source lumineuse (2) émettant un faisceau lumineux incident (10),

- un polariseur (20, 70) polarisant linéairement ledit faisceau incident (10),

- un modulateur de polarisation (6A, 6B, 6C) modulant ledit faisceau incident (10), ledit échantillon (1) recevant le faisceau incident modulé (11) et renvoyant un faisceau de mesure (12),

- des moyens de détection (4) du faisceau de mesure (12) produisant des signaux électriques, et

- une unité de traitement (5) recevant les signaux électriques produits par les moyens de détection (4),

caractérisé en ce que le modulateur de polarisation (6A, 6B, 6C) est inclus dans un composant optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, en ce que les moyens de détection (4) comportent un polarimètre produisant n quantités mesurées ( $I_1$ - $I_n$ ) représentant les états de polarisation du faisceau de mesure (12) et en

ce que l'unité de traitement (5) produit par transformée de Fourier m valeurs pour chacune des n quantités mesurées ( $I_1$ - $I_n$ ), avec  $n \times m \geq 16$

et  $m \geq 4$ , permettant d'accéder simultanément aux seize coefficients de la matrice de Mueller (M).

10. Ellipsomètre selon la revendication 9, caractérisé en ce que  $n \geq 4$  et le polarimètre n'introduit pas de nouvelle modulation temporelle.

11. Ellipsomètre selon la revendication 10, caractérisé en ce que  $n = 4$  et  $m = 4$  et en ce que le polarimètre sépare les quatre états de polarisation du faisceau de mesure (12) associés auxdites quatre quantités mesurées ( $I_1 - I_4$ ).

- 10 12. Ellipsomètre selon la revendication 11, caractérisé en ce que ledit composant optique étant défini par l'une quelconque des revendications 2 à 5, les quatre valeurs produites par transformée de Fourier pour chaque quantité mesurée ( $I_1 - I_4$ ) dépendant du temps  $t$  sont les coordonnées harmoniques de ladite quantité mesurée ( $I_1 - I_4$ ) dans la base:

$\cos \omega t, \sin \omega t, \cos 2 \omega t, \sin 2 \omega t$ .

13. Ellipsomètre selon la revendication 11, caractérisé en ce que ledit composant optique étant défini par l'une des revendications 6 ou 7, les quatre valeurs produites par transformée de Fourier pour chaque quantité mesurée ( $I_1 - I_4$ ) dépendant du temps  $t$  sont les coordonnées harmoniques de ladite quantité mesurée ( $I_1 - I_4$ ) dans la base:

$1, \cos \omega t, \sin 2 \omega t, \cos 2 \omega t$ .

14. Ellipsomètre selon l'une quelconque des revendications 9 à 13, caractérisé en ce que les deux modulations appliquées ayant un même déphasage  $\delta$  dépendant du temps  $t$ , l'unité de traitement (5) produit les  $m$  valeurs pour chaque quantité mesurée ( $I_1 - I_m$ ), ladite quantité mesurée étant une fonction  $f$  du temps  $t$ , au moyen d'une transformée de Fourier spéciale selon laquelle, l'intervalle  $[0, 2\pi/\omega]$  étant discrétisé en  $2N$  points  $T_k$  équi-répartis et la fonction  $f$  étant calculée à des instants d'échantillonnage  $t_k$  donnés par:

$$\delta(t_k) = \omega T_k,$$

pour  $k$  variant de 0 à  $2N-1$ , l'unité de traitement (5) évalue la  $j$ -ème composante harmonique  $H_j$  de la fonction  $f$ , par:

$$H_j = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{2N-1} f(t_k) \exp(-ij \omega T_k),$$

avec  $i^2 = -1$ .

- 15 14. Ellipsomètre selon l'une quelconque des revendications 9 à 14, caractérisé en ce que les moyens de détection (4) et l'unité de traitement (5) sont adaptés à des mesures spectroscopiques.

- 10 16. Procédé de calibrage de l'ellipsomètre selon l'une quelconque des revendications 9 à 15, caractérisé en ce que le polariseur (20, 70) et le modulateur de polarisation (6A, 6B, 6C) constituant un générateur d'états de polarisation (3), ledit générateurs d'états de polarisation (3) et lesdits moyens de détection (4) ayant respectivement une matrice de modulation (W) et une matrice de détection (A):

- 15 - on choisit un ensemble d'entités de calibrage ayant des matrices de Mueller (M) connues, l'une desdites entités correspondant à la matrice identité (I0),

- 20 - pour chacune des entités de calibrage, on adopte ladite entité comme échantillon (1) dans l'ellipsomètre, on émet un faisceau lumineux incident (10) polarisé linéairement avec la source lumineuse (2) et le polariseur (20, 70), on module le faisceau incident (10) par le modulateur couplé (6A, 6B, 6C), on envoie le faisceau incident modulé (11) sur ladite entité (1) et on renvoie un faisceau de mesure (12), on produit lesdites quantités mesurées ( $I_1 - I_n$ ) par les moyens de détection (4) et lesdites valeurs par l'unité de traitement (5), et on  
25 construit à partir desdites valeurs une matrice mesurée (AMW), produit des matrices de détection (A), de Mueller (M) de ladite entité et de modulation (W),

- on établit un système d'équations linéaires à partir des matrices produits mesurées (AMW), et

- 30 - on résout ledit système de façon à extraire les matrices de modulation (W) et de détection (A).

17. Procédé de calibrage selon la revendication 16, caractérisé en ce qu'on choisit un ensemble d'entités comprenant:

- un polariseur linéaire à 0° en transmission,

- un polariseur linéaire à  $45^\circ$  en transmission, et
  - un polariseur partiel et déphaseur sans valeurs singulières.
18. Procédé de mesure ellipsométrique destiné à la mesure d'un échantillon (1) représenté par des coefficients d'une matrice de Mueller (M), dans lequel:
- on émet un faisceau lumineux incident (10) polarisé linéairement,
  - on module le faisceau incident (10) par un modulateur de polarisation (6A, 6B, 6C),
  - on envoie sur l'échantillon (1) le faisceau incident modulé (11) et on renvoie un faisceau de mesure (12),
  - on détecte le faisceau de mesure (12) et on produit des signaux électriques, par des moyens de détection (4), et
  - on transmet les signaux électriques à une unité de traitement
- (5),
- caractérisé en ce que:
- on applique deux modulations de phase successives au faisceau incident (10) au moyen du modulateur de polarisation (6A, 6B, 6C), les deux modulations étant strictement à la même fréquence  $\omega/2\pi$  et étant couplées,
  - on produit n quantités mesurées ( $I_1 - I_n$ ) représentant chacune un état de polarisation du faisceau de mesure (12), par les moyens de détection (4),
  - on produit par transformée de Fourier m valeurs pour chacun des n quantités mesurées au moyen de l'unité de traitement (5), avec  $n \times m \geq 16$  et  $m \geq 4$ , permettant d'accéder aux seize coefficients de la matrice de Mueller (M).

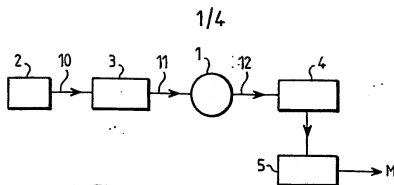


FIG.1

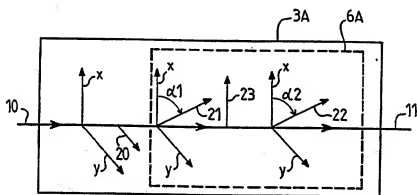


FIG.2

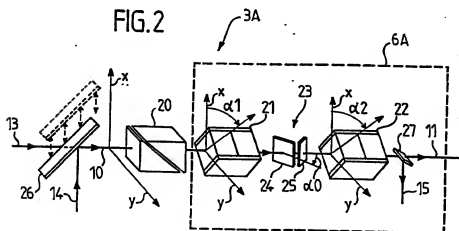
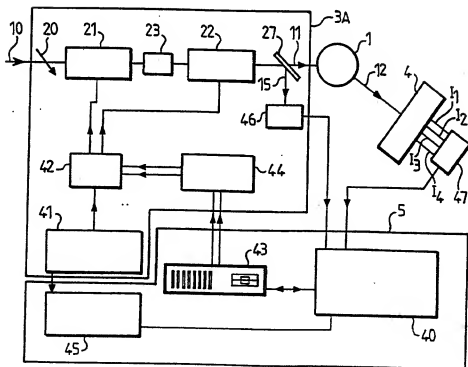
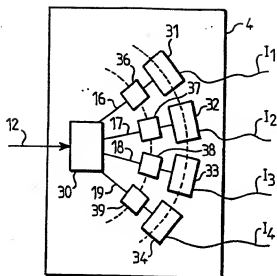


FIG.3

2/4



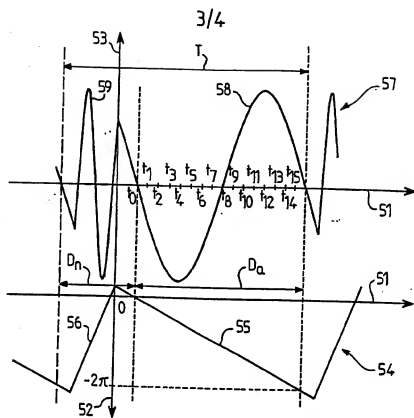


FIG. 6

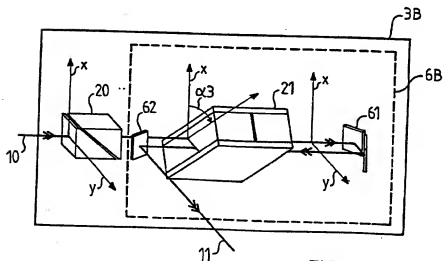


FIG. 7



4/4

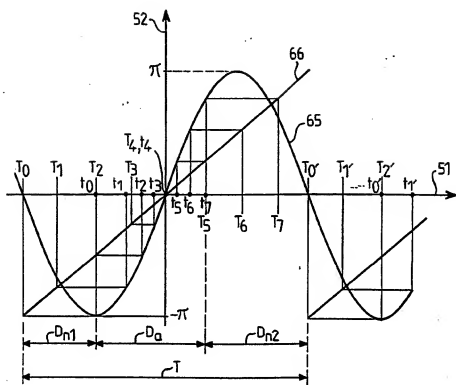


FIG. 8

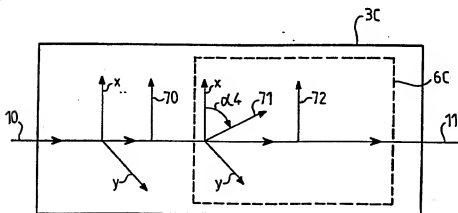


FIG. 9

INSTITUT NATIONAL

## RAPPORT DE RECHERCHE

N° d'enregistrement  
national

## PRELIMINAIRE

de la

FA 535197

PROPRIETE INDUSTRIELLE

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

FR 9613081

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
X	LEST Technical Report No. 54, Institute of Theoretical Astrophysics, University of Oslo, 1992 XP000645515	1
A	J.O. STENFLO et al: "Demodulation of all four Stokes parameters with a single CCD: ZIMPOL II - Conceptual design" * page 13, ligne 5 - ligne 10 *	4,7
Y	* figure 2 *	8,9,15, 18
Y	--- OPTICAL ENGINEERING, vol. 34, no. 7, Juillet 1995, BELLINGHAM US, pages 1870-1878, XP000517055 H. POVEL: "Imaging Stokes polarimetry with piezoelectric modulators and charge-coupled device image sensors" * page 1876, colonne de droite, ligne 15 - * page 1877, colonne de gauche, ligne 4 * * page 1877, colonne de droite, ligne 13 - ligne 19 *	8,9,15, 18
D,Y	--- SURFACE SCIENCE, vol. 96, 1980, pages 108-140, XP000195533 P.S. HAUGE: "Recent developments in instrumentation in ellipsometry" * page 111, ligne 14 - ligne 20 * * page 120, dernière ligne - page 121, dernière ligne *	9,15,18
A	* page 123, ligne 1 - page 130, ligne 10 * * page 133, ligne 20 - page 134, ligne 15 * --- -/-	10-14
		601J
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.6)
Date d'achèvement de la recherche		Examinateur
9 Juillet 1997		Thomas, R.M.
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		
<p>X : particulièrement pertinent à lui seul</p> <p>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie</p> <p>A : pertinent à l'encontre d'un moins une revendication un arrière-plan technologique général</p> <p>O : divulgation non-écrite</p> <p>P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention</p> <p>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.</p> <p>D : cité dans la demande</p> <p>L : cité pour d'autres raisons</p> <p>d : membre de la même famille, document correspondant</p>		

1  
EPO FORM 1500 (04/91) (P/M/CL)

INSTITUT NATIONAL

RAPPORT DE RECHERCHE  
PRELIMINAIREN° d'enregistrement  
national

de la

PROPRIETE INDUSTRIELLE

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

FA 535197

FR 9613081

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol. 59, no. 1, Janvier 1988, NEW YORK US, pages 84-88, XP002034814 R.M.A. AZZAM ET AL: "Construction, calibration and testing of a four-detector photopolarimeter" * page 85, colonne de gauche, ligne 4 - page 86, colonne de gauche, ligne 32 * ---	16,17
D,A	APPLIED OPTICS, vol. 19, no. 8, 15 Avril 1980, NEW YORK US, pages 1323-1332, XP002034815 R.C. THOMPSON ET AL: "Measurement of polarized light interactions via the Mueller matrix" ---	
A	US 4 306 809 A (AZZAM) -----	
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.6)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
9 Juillet 1997		Thomas, R.M.
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		
<p>X: particulièrement pertinent à lui seul  Y: particulièrement pertinent en combinaison avec un  autre document de la même catégorie  A: pertinent à l'encontre d'au moins une revendication  ou sous-plan technologique général  O: divulgation non-écrite  P: document intercalaire</p> <p>T: théorie ou principe à la base de l'invention  E: document de brevet bénéficiant d'une date antérieure  à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date  de dépôt ou qu'à une date postérieure.  D: cité dans la demande  L: cité pour d'autres raisons</p> <p>-----  &amp;: membre de la même famille, document correspondant</p>		

1  
EPO FORM 1503 ALLE (F/M/C/L)